

SZAKMAI ZÁRÓBESZÁMOLÓ

Korszerű szélgenerátorok és magyarországi alkalmazhatóságuk

című

T046916 nyilvántartási számú

OTKA kutatási projektről

Kutatási eredményeinket a lejelentett publikációkban közzétettük, így itt elegendő azokat röviden ismertetni. A publikációk listája e dokumentum végén is megtalálható a hivatkozás egyértelművé tétele érdekében.

A kutatási területek és az elért eredmények a következők szerint csoportosíthatók:

- 1) A lehetséges generátor típusok és szabályozásaik.
- 2) A lehetséges áramvektor szabályozási módok.
- 3) A magyarországi szélenergia környezet és potenciál vizsgálata.
- 4) Szempontok szélerőművek magyarországi telepítéséhez.
- 5) Energiatárolási lehetőségek vizsgálata.
 - a) Hidrogén energetika alkalmazása.
 - b) Lendkerekes energiatároló.
- 6) Hálózati áramirányítók áramgenerátoros közbülső egyenáramú körrel.
- 7) Tovább lépés lehetőségei.

1. A LEHETSÉGES GENERÁTOR TÍPUSOK ÉS SZABÁLYOZÁSAIK

A lehetséges szélgenerátor típusokat az 1. ábra foglalja össze. Részletesen a változtatható fordulatszámú szélgenerátorokat vizsgáltuk, mivel csak ezekkel biztosítható a szélturbina optimális aerodinamikai hatásfoka, ami által ezekkel éves szinten 5-10%-kal több energia termelhető mint az állandó szélsébségűekkel: A korszerű szélgenerátorok 80%-át kitevő b/, e/ és k/ megoldásokat (1. ábra) vizsgáltuk (sorrendben RZ, CS és SZ betűkombinációval jelölve a továbbiakban):

Összehasonlításuk eredménye:

RZ: Rövidrezárt forgórészű aszinkron szélgenerátor.

Előnye: Egyszerű, olcsó felépítés.

Hátránya: bonyolult szabályozás, rosszabb eredő hatásfok.

CS: Kétoldalról táplált (csúszógyűrűs) aszinkron szélgenerátor.

Előnye: Nem a teljes teljesítmény megy át az átalakítón, az jóval kisebb teljesítményű is lehet (tipikusan ~30%). Ezért ez a legelterjedtebb a nagyobb teljesítmény tartományban.

Hátránya: Bonyolultabb és drágább forgórész.

SZ: Állandómágneses szinkron szélgenerátor.

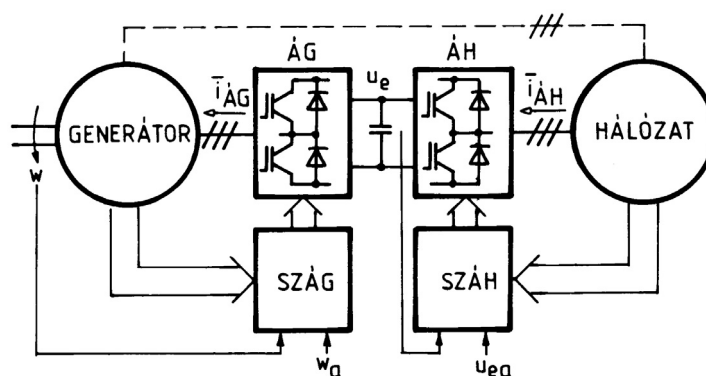
Előnye: Egyszerű szabályozás.

Hátránya: Drága forgórész az állandómágnesek miatt.

Aszinkron generátorok		Szinkron generátorok	
Rövidrezárt forgórész	a) közvetlenül hálózatra kapcsolva	Elektromágneses forgórész	g) közvetlenül hálózatra kapcsolva
	b) közbülső egyenáramú körös frekvenciaváltóval kapcsolva a hálózatra		h) közbülső egyenáramú körös frekvenciaváltóval kapcsolva a hálózatra
	c) közvetlen frekvenciaváltóval kapcsolva a hálózatra		i) közvetlen frekvenciaváltóval kapcsolva a hálózatra
Csúszógyűrűs forgórész	d) közvetlenül hálózatra kapcsolva forgórész körű ellenállás változtatással	Állandómágneses forgórész	j) közbülső egyenáramú körös frekvenciaváltóval kapcsolva a hálózatra
	e) kétoldaltól táplált ASG közbülső közbülső egyenáramú körös frekvenciaváltóval		k) közbülső egyenáramú körös frekvenciaváltóval kapcsolva a hálózatra
	f) kétoldaltól táplált ASG közvetlen frekvenciaváltóval		l) közvetlen frekvenciaváltóval kapcsolva a hálózatra

1. ábra. Szélgenerátor típusok

Egy korszerű szélgenerátor általános felépítését a 2. ábra mutatja.



2. ábra. Korszerű feszültséginverteres szélgenerátorok blokkvázlata.

A GENERÁTOR a fentebb felsorolt típusú lehet.

A fölérendelt szabályozások általánosan a következő típusúak:

SZÁG-ban: Szögsebesség szabályozás. Az optimális energiaátalakítás céljából.

SZÁH-ban: Egyenfeszültség szabályozás. Az energia egyensúly biztosítása céljából.

2. A LEHETSÉGES ÁRAMVEKTOR SZABÁLYOZÁSI MÓDOK

SZÁG alárendelt szabályozásának lehetséges megvalósításai:

Mezőorientált áramvektor szabályozás, orientáló mező:

- SZ: állandómágneses forgórész pólusfluxus vektora,
- RZ: rövidrezárt forgórész fluxusvektora,
- CS: hálózatra kapcsolt állórész fluxusvektora.

Közvetlen nyomaték és fluxus szabályozás, szabályozott fluxus:

- SZ: állórész fluxus amplitúdó,
- RZ: állórész fluxus amplitúdó,
- CS: forgórész fluxus amplitúdó.

SZÁH alárendelt szabályozásának lehetséges megvalósításai:

Hálózatorientált áramvektor szabályozás, orientáló vektor:

- Hálózati feszültségvektor,
- Fiktív hálózati fluxusvektor.

Közvetlen hatásos és meddő teljesítmény szabályozás.

Az orientált áramvektor szabályozások megvalósítása tovább csoportosítható:

- Térvektoros ISZM áramvektor szabályozások.
- Háromfázisú fázisonkénti áram kétpont szabályozások.
- Háromfázisú, fázisonkénti ISZM modulátoros áramvektor szabályozások.

Megállapítható a nagymértékű univerzalitás:

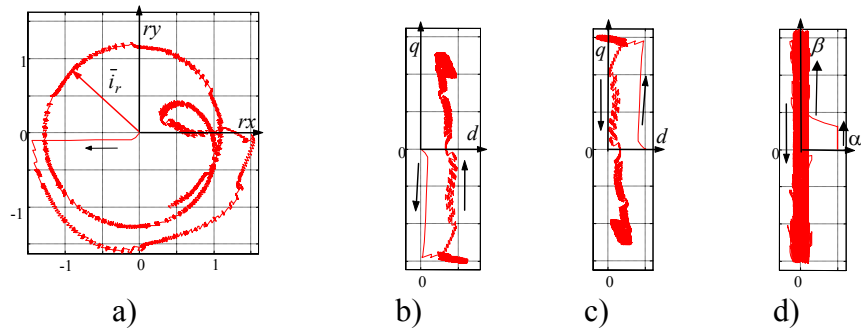
- Géptípustól függetlenül mindegyik használható.
- A hálózat és generátor oldalon ugyanazok az elvek és megoldások használhatók.

Vizsgálataink eredményei:

- Az összes itt felsorolt szabályozási és vezérlési elvet megvizsgáltuk különféle közelítések alkalmazásával [1], [2], [6], [8], [10], [14], [17]. Vizsgálatainkban összehasonlítottuk őket a következő szempontok szerint:
 - Dinamika szempontjából a hiszterézises szabályozások (kétpont szabályozás, közvetlen szabályozások) adódnak a legrobustusabbnak és a leggyorsabbnak [10], [14], [6], [17].
 - Az ISZM modulátoros megoldások nagy előnye a konstans és kézben tartható kapcsolási frekvencia [10].
 - A térvektoros vezérlés a kivezérelhetőséget javítja.
 - A szabályozás koordináta rendszerének megválasztása befolyásolja a szükséges koordináta transzformációk számát. Ez a szükséges számítási teljesítményen keresztül korlátozhatja a kapcsolási frekvenciát.
 - A közvetlen szabályozások nagy előnye, hogy nem igényelnek koordináta transzformációt. Ekkor viszont szükség van egy viszonylag bonyolult rendszermodell on-line számítására [6], [13], [17]. **Előnyös tulajdonságai**

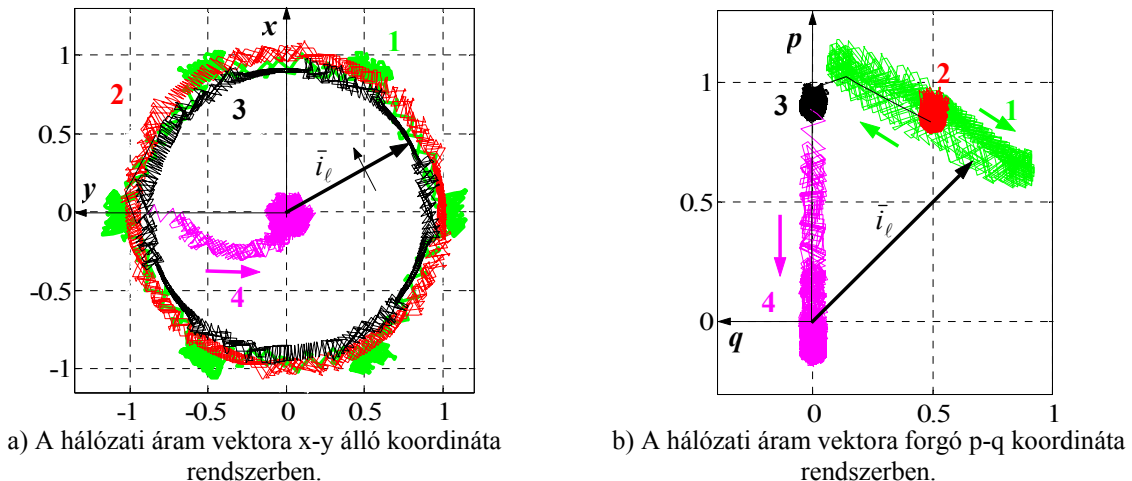
alapján ezt a szabályozási módot tartjuk egy további és részletesebb vizsgálatra érdemes módszernek.

- Meghatároztuk a közvetlen szabályozások gyakorlati alkalmazás során is figyelembe veendő korlátait a különféle implementációkban [6].
- Meghatároztuk a lehetséges kiegészítő szolgáltatások (felharmonikus szűrés, meddő kompenzálás, aszimmetria kompenzálás) elvi alapjait, amelyek akár szélmentes időben is működőképesek [13], 4. ábra. **Ez egy perspektivikus, tovább vizsgálendő téma.**
- A megjelölt generátor típusokat is összehasonlítottuk. A legkedvezőbb tulajdonságokkal rendelkező kétoldalról táplált aszinkron szélgenerátort részletesebben is megvizsgáltuk [10], [6], [14], 3. ábra.
 - Szabályozásának megvalósítási lehetőségeit kidolgoztuk és megvizsgáltuk.
 - Egy speciális jelenség, a sztátor fluxus lengésének problémáját megvizsgáltuk, és megoldást dolgoztunk ki megszüntetésére [10], [14].
- Néhány jellegzetes térvektor pályát itt is közlünk (3. ábra, 4. ábra):



3. ábra. Kétoldalról táplált aszinkron szélgenerátor áramvektora.

- A rotor áram a rotorhoz rögzített koordináta rendszerben.
- A rotor áram d - q koordináta rendszerben.
- Sztátor áram d - q koordináta rendszerben.
- Hálózati áram forgó (α - β) koordináta rendszerben.



4. ábra. Felharmonikus és meddőkompenzálás a hálózatoldali áramirányító áramvektor szabályozásával.

3. A MAGYARORSZÁGI SZÉLENERGIA KÖRNYEZET ÉS POTENCIÁL VIZSGÁLATA [5], [9], [12]

A szélenergia hasznosításának területén bekövetkezett változások szükségessé tették Magyarország szélenergia potenciáljának újbóli meghatározását. A teljes szélenergia potenciál, amely kétféle módszerrel is becsülve lett meglepően nagy. A hasznosítható szélenergia potenciált nagyszámú modern és gazdaságosan méretezett szélerőmű feltételezésével számítottuk ki [5], [9], [12].

Vizsgálataink eredménye:

Magyarország hasznosítható szélenergia potenciálja a korlátozó tényezők figyelembevételével, $H=75\text{m}$ tengelymagasságú és $D=75\text{m}$ átmérőjű szélturbinák esetén:

$$\Sigma E = 56,85 \text{ TWh/év} = 204,7 \text{ PJ/év} \quad (P_{\text{éves átl}} = 6489 \text{ MW}).$$

Ez az eredmény elfogadható összhangban van a levegő kinetikus energiája alapján számított $E_0 = 89,8 \text{ TWh/év}$ teljes szélenergia potenciállal.

Megjegyezzük, hogy pl. a $H=100\text{m}$ -es magasságban érvényes széltérképet és $D=100\text{m}$ átmérőjű turbinákat használva (a $H=75\text{m}$ -es magassághoz viszonyítva) kb. 38%-kal nagyobb ($77,6 \text{ TWh/év}$) potenciális energiát kapunk, ami egyértelműen arra utal, hogy ma már nem szabad Magyarországon 100m -nél kisebb tengelymagasságú turbinákat alkalmazni! A növekedés egyértelműen a turbináknál magasabban levő légrétegek kinetikus energiájából származik. A $77,6 \text{ TWh/év}$ kb. kétszeresen haladná meg az ország jelenlegi éves energiaigényét. Ha csupán az ország legszelesebb területeit ($v_{\text{átl}}(100) > 6\text{m/s}$) használnánk a jelzett erőművekkel, akkor Magyarország jelenlegi energiaszükségletének több mint felét lehetne kinyerni az ország területének mindössze 4,5%-ról.

4. SZEMPONTOK SZÉLERŐMŰVEK MAGYARORSZÁGI TELEPÍTÉSÉHEZ [4]

Célunk azoknak a szabályoknak, tényezőknek a megállapítása volt, amelyeknek alapján a hazai szélviszonyoknak legjobban megfelelő szélerőművek választhatók ki (esetleg méretezhetők). Ebből a szempontból a legfontosabb jellemző az egységnyi kinyert energia ára, amelynek a minimumát kerestük. A hazai szélviszonyok elsősorban az alacsony átlagos éves szélesebségekben térnek el azon szélviszonyoktól, amelyekre az eddigi megépült szélerőművek többségét tervezték, de más paraméterekben is megfigyelhetők különbségek.

Vizsgálataink eredményei:

- A vizsgálatokhoz kidolgoztunk egy hatékonyan alkalmazható költségmodellt a bevezetett fajlagos energiaár figyelembevételével.
- Kiadódott, hogy a v_i indulási sebességet egyértelműen a lehető legkisebb értékre kell lezorítani, ami az alacsony szélesebségek miatt fokozottan igaz Magyarországra.
- Kidolgoztuk a minimális energiaár elérésének elvi alapjait az optimális geometriai méretek alapján. A magyarországi szélviszonyokra a tengerpartiénál nagyobb terepérdességi értékek jellemzőek. A növekvő terep érdességgel az optimális átmérők egyértelműen a nagyobb értékek felé tolódnak el.
- Megvizsgáltuk a minimum energiaár függését a névleges szélesebségtől. A legszembetűnőbb változást az éves átlagos szélesebségek változása okozza a kinyert energiákban, amely kb. felére csökken le, ha $v_{\text{átl}}$ a 0,8-szorosára csökken. A fajlagos energiaköltségek kb. 1,5-szörösére nőnek a fenti esetben, annak ellenére, hogy az erőművet a kisebb szélesebségre méretezik. Ha azonban olyan szélerőművet vásárolunk meg, amely $1/0,8=1,25$ -szörös átlagos szélesebségre lett méretezve, akkor a változatlan (tényleges alkalmazástól független) költségek miatt a fajlagos energiaár a tervezettnél kb. a kétszerese lesz a hazai viszonyok között!

Egyedi szélerőművek, ill. kis és közepes nagyságú szélparkok esetén alapvető gazdaságossági követelmény, hogy 10km -es távolságon belül legyen csatlakozásra alkalmas közép feszültségű

vezeték vagy alállomás. Ezt a feltételt már a szélenergia potenciál egy huszad részét hasznosító szélerőmű parkok esetén sincs értelme vizsgálni, hiszen ez a teljes távvezetékrendszer erőteljes módosítását igényelné az irányítási rendszerrel együtt. Ha a távlati energiapolitika jelentős szélenergia kihasználást tervez egy régióban, úgy célszerű lenne legalább áramszolgáltatói szinten előre megtervezni és kivitelezni a gerincvezeték, és nem a beruházói igények jelentkezése szerint többször módosítani azt.

5. ENERGIATÁROLÁSI LEHETŐSÉGEK VIZSGÁLATA

Az energiatárolás legnagyobb előnye, hogy lehetővé teszi az energiatermelés és az energia fogyasztás szétcsatolását. Ez a lehetőség nagyon jól jön az időszakosan váltakozó intenzitással rendelkezésre álló megújuló energiaforrások alkalmazása esetén. Különösen igaz ez a viszonylag gyorsan változható szélviszonyok miatt a szélenergiára. Az energiarendszer irányítása megköveteli a teljesítmény egyensúlyt és a gazdaságos menetrend tartást. A sztochasztikusan rendelkezésre álló energia (szél, nap) miatt erős ellenérzés tapasztalható alkalmazásával kapcsolatban a rendszerirányítók részéről. Az energiatárolás azonban megoldja ezt a problémát: az energia termelés és a fogyasztás időben eltolható egymáshoz képest. Ha az igényekhez képest többlet energiánk van szélenergiából (völgy-időszakban), az eltárolható. Ha a rendelkezésre álló energia kevesebb az igényelnél (csúcs-időszak), a hiány fedezhető az eltárolt energiából. Így az energiatárolás nagyléptékű alkalmazása jelentős támogatást és lökést adhat a megújuló energiafajták, köztük a szél és napenergia szélesebb körű alkalmazásának.

RENDSZERIRÁNYÍTÁSI GONDOK

Magyarország erőműparkja rugalmatlan:

- kb. 8500 MW a teljes kapacitás,
- 3000 MW alaperőmű,
- 3000MW nem szabályozható erőmű,
- sok a kötelező átvétel.

Gondok kis szélsébség esetén:

- használni kell a drágábban termelő erőműveket,
- ezek lassan tudják átvenni a terhelést,
- a régi hőerőműveket fokozatosan fel kell számolni.

Gondok nagy szélsébség esetén:

- vissza kell szabályozni a gazdaságosan termelő erőműveket is,
- ennek biztonsági és élettartambeli kockázatai vannak.

Rövid távon: néhány enyhítő intézkedés:

- a kötelező átvétel ésszerű átalakítása,
- a szélerőművek központi szabályozása/irányítása,
- külföldi szivattyús-tározós erőművek bérlete,
- osztrák érdekeltségű szélerőművek esetén közös mérlegkör.

a) Hidrogén energetika alkalmazása [7], [16]

Középtávon az egyik lehetséges megoldás a hidrogén energetika használata

- Völgy időszakokban és nagy szélsébség esetén tárolni lehet a „felesleges” energiát hidrogén formájában.
- Csúcsidőszakokban a tárolt energia visszatáplálható üzemanyagcellákkal.

A hidrogén energetika alkalmazásának további előnyös hatásai:

- besegít a menetrend tartásba,

- kiszűri a turbulencia okozta lüktetéseket a szélérőmű leadott teljesítményéből,
- növeli a szélérőművek leadható energiáját,
- támogatja a rövididejű áthidalásokat,
- gyors reagálás terhelésváltozás esetén

Hidrogén előállítása szélérőművekkel négy üzemmódban lehetséges:

1. A szélérőmű csak hidrogént állít elő.
2. A szélérőmű völgyidőszakban hidrogént, csúcsideőszakban villamos energiát állít elő, a hidrogént elszállítják.
3. A termelt hidrogént a helyszínen üzemanyagcellákkal visszaalakítják villamos energiává.
4. A termelt hidrogént részben elszállítják, részben a helyszínen felhasználják üzemanyagcellákban.

Megvizsgáltuk a különféle üzemmódokat és a tipikus kapcsolásaikat. Ezek járulékos áramkörei alapvetően a közbülső egyenáramú körre kapcsolódó berendezések. Mindegyik típusnál lehetséges a váltakozóáramú oldali csatlakoztatás. Ez azonban bonyolult és költségesebb.

A hidrogén energetika és üzemanyag cellák együttes alkalmazásának témáját érdemes továbbvinni egy következő kutatási projektben.

b) Lendkerekes energiatároló [15]

A lendkereket, mint energiatárolót újra felfedezik napjainkban, köszönhetően kedvező tulajdonságainak, összehasonlítva egyéb tárolási formákkal (megbízhatóság, élettartam, ár, gyors reagálás). A lendkerék forgó tömegben tárol kinetikus energiát. A megújuló energiaforrások átalakítóinak szokásos teljesítménytartományában ez a módszer gazdaságosan rövid idejű (maximum. pár perces) energiatárolásra képes. Ez pl. szélenergia esetén a turbulenciából adódó teljesítménylökítés kompenzálására használható.

A lendkerék „töltéséhez-kisütéséhez” egy kétnegyedes villamos hajtás szükséges. A szükséges teljesítményelektronikai berendezés elemei, az áramirányítók ugyanolyan felépítésűek lehetnek, mint a fő energia-átalakítóban. Az alkalmazható áramvektor szabályozások is ugyanazok.

A [15]-ben leírt vizsgálattal tettünk egy kezdeti lépést a lendkerék hajtás rendszerszintű vizsgálatával. **Ezek a kutatások egy következő projekt keretében folytatódhatnak.**

6. HÁLÓZATI ÁRAMIRÁNYÍTÓK ÁRAMGENERÁTOROS KÖZBÜLSŐ EGYENÁRAMÚ KÖRREL [8], [11]

Ez a téma egy kitekintés a hálózati áramirányítók egy másik fajtája irányába. Ennek is van létjogosultsága szélgenerátorok esetén is. Vizsgálataink eredményeivel a térvektoros ISZM megvalósítási lehetőségeire és a szűrőkörök méretezésére adtunk megoldásokat.

7. TOVÁBLÉPÉS LEHETŐSÉGEI

A jelentésben már említett továbblépési lehetőségeket foglaljuk össze:

- A számos szempontból előnyös tulajdonságokkal rendelkező közvetlen szabályozások további részletes vizsgálatai.
- A kiegészítő szolgáltatások részletes vizsgálatai.

- Az energiatárolók alkalmazásának, megvalósításának vizsgálatai (hidrogén energetika + üzemanyag cellák, lendkerekes energia tároló).

PUBLIKÁCIÓK:

- [1] Bakos D; Schmidt I; Veszprémi K: *Inverter Switching Loss of Sinusoidal-Field Permanent Magnet Synchronous Drive at Different Current Control Methods*, CD ROM paper No. A32216. in Proc. Conference on Power Electronics and Motion Control, EPE-PEMC'2004. Riga, Sept. 2-4. ISBN 9984-32-010-3, 2004
- [2] Bakos D; Schmidt I; Veszprémi K; Vincze Gyné: *Négyszögmezős szinkronmotoros szervohajtás kommutációs folyamata*, Elektrotechnika, 97. évf. Tudományos Különszám, 10-13., 2004
- [3] Veszprémi K: *Comprehensive Optimization of Brushless Excitation of Synchronous Machine*, CD-ROM paper in Proc. 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 04, Busan, Nov. 2-6. ISBN0-7803-9731-1, 2004
- [4] Hunyár M; Veszprémi K: *Szemponatok szélerőművek magyarországi telepítéséhez*, in Proc. Klímaváltozás-Energiatudatosság-Energiahatékonyság IV Nemzetközi Konferencia, Visegrád, június 8-10., 2005
- [5] Hunyár M; Veszprémi K; Szépszó G: *Újdonságok Magyarország szélerőenergia potenciáljáról*, Előadás a Magyar Meteorológiai Társaság, "Szél és napenergia Magyarországon" témájú projektjének előadás-sorozatában. Budapest, október 13., 2005
- [6] Schmidt I; Veszprémi K: *Application of Direct Controls to Variable-Speed Wind Generators*, CD-Rom paper, in Proc. IEEE International Conference on Industrial Electronics and Control Applications, ICIECA 2005, Quito, Nov. 29-Dec. 2. ISBN:0-7803-9420-8, 2005
- [7] Hunyár M; Tóth P; Kircsi A; Veszprémi K: *Szélerőenergia hasznosítás Magyarországon hidrogénfejlesztéssel összekötve*, Első Nemzetközi Hidrogén Energetikai Fórum Budapesten, Magyar Energetikai Társaság és a CHIC Közép-magyarországi Innovációs Központ Kht. szervezésében. Budapest, okt.9-10, 2006
- [8] Hunyár M; Veszprémi K; Halász S: *Térvektoros ISZM vezérlésű háromfázisú hálózati áramirányítók áramgenerátoros közbenső egyenáramú körrel*, Elektrotechnika, 99. évf. 9. szám, 3-5., 2006
- [9] Hunyár M; Veszprémi K; Szépszó G: *Újdonságok Magyarország szélerőenergia potenciáljáról*, pp.94-113 in Dobi Ildikó szerk.: Magyarországi szél és napenergia kutatás eredményei, Magyar Meteorológiai Szolgálat, ISBN 963 7702 95 4, 2006
- [10] Schmidt I; Veszprémi K: *Field Oriented Current Vector Control of Fed Induction Wind Generator-Double*, pp.988-993. in Proc. IEEE The 32nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society IECON'06. Paris, Nov. 6-10. ISBN:1-4244-0136-4., 2006
- [11] Hunyár M; Schmidt I; Veszprémi K; Halász S: *Áramgenerátoros hálózati áramirányítók szűrőkörének méretezése*, Elektrotechnika, 100. évf. 4. szám, 11-13., 2007
- [12] Hunyár M; Veszprémi K: *Megújuló energiaforrások alkalmazása az épületgépészeti rendszerekben*, 12.8 fejezet, 79 oldal, in Bánhidi László szerk.: Épületgépészet a gyakorlatban, Verlag Dashöfer Szakkiadó, Budapest, ISBN 963 9313 21 1, 2007

- [13] Schmidt I; Veszprémi K: ***Additional Application Field of a Modern Wind Generator Even at No-Wind***, CD-ROM paper, 10 pages, in Proc. 12th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE'2007, Aalborg, Sept. 2-5. ISBN:9789075815108, 2007
- [14] Schmidt I; Veszprémi K; Hunyár M;: ***Kétoldalról táplált szélgenerátor mezőorientált szabályozása***, Elektrotechnika, 100. évf. 11. szám, 10-13., 2007
- [15] Veszprémi K; Schmidt I: ***Flywheel Energy Storage Drive for Wind Turbines***, pp.916-922. in Proc. 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'2007, Bangkok, Nov. 27-30., ISBN:1-4244-0645-5, 2007
- [16] Hunyár M; Veszprémi K: ***Elosztott energiatermelés technológiája***, Leonardo Power Quality Initiative Vocational Education System (LPQIVES) szakmai szemináriumon előadás, A szeminárium címe : „Elosztott energiatermelés és hatásai a villamosenergia minőségére”, 2007. március 22. MEE
- [17] Veszprémi K; Schmidt I: ***Direct Controls in Voltage-Source Converters - Generalizations and Deep Study***, in Proc. Conference on Power Electronics and Motion Control, EPE-PEMC'2008. Poznan, Sept, 1-3. közlésre elfogadva, 2008